

文章编号: 1001-1455(2008)06-0561-04

水泥砂浆在主动围压下的动态力学性能^{*}

薛志刚, 胡时胜

(中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要: 水泥砂浆等脆性材料的力学性能与所受围压的大小密切相关。为了研究水泥砂浆在围压下的动态力学性能, 研制了适于分立式 Hopkinson 压杆加载的主动围压装置, 最大预加载主动围压大于 30 MPa。实验得到了水泥砂浆在不同围压、不同应变率下的轴向应力应变曲线, 发现材料在围压作用下抗压强度和韧性大大提高并且整体进入了伪塑性, 而材料的应变率效应也是显著的。

关键词: 固体力学; 动态力学性能; 主动围压; 水泥砂浆; 霍普金森压杆

中图分类号: O344.1

国标学科代码: 130 · 15

文献标志码: A

1 引 言

研究混凝土的动态力学性能在军事和民用上都有着重要的意义。水泥砂浆作为混凝土的基础材料, 基本反映了混凝土的力学性能。诸多实验研究表明, 水泥砂浆类脆性材料的力学性能与材料所受围压的大小密切相关。围压可以分为主动围压和被动围压, 被动围压在实验过程中大小是变化的, 而主动围压在实验过程中保持不变, 主动围压加载方式能够更好地研究材料力学性能随所受围压大小的变化规律, 但装置也相对复杂。施绍裘等^[1-2]做了水泥砂浆准一维应变(被动围压)和一维应变(轻气炮)下的动态力学性能实验研究。D. P. Candappa 等^[3]、谢和平等^[4]分别做了混凝土在主动围压下的准静态力学性能实验研究。主动围压下此种材料的动态力学性能的实验数据相对较少。G. Gary 等^[5]设计了用于动态实验的主动实验装置, 实验过程中试件受三向油压作用, 缺点是轴向预加压力不易控制。

本文中设计了适于分离式 Hopkinson 压杆加载的主动围压装置, 本装置利用橡胶环进行密封并将试件与液压油隔离, 试件轴向在围压时不受力, 仅依靠 Hopkinson 压杆加载, 这种加载方法简单可靠, 但预加载围压的大小受到试件剪切强度限制。实验得到水泥砂浆在相同应变率不同围压下和相同围压不同应变率下的轴向应力应变曲线, 同时发现水泥砂浆在围压下抗压强度和韧性与应变率密切相关。

2 实验方法

实验用的主动围压装置和分离式 Hopkinson 压杆如图 1 所示, 使用的水泥砂浆试件根据 C30 配比制成, 试件为圆柱形试件, 尺寸为 $\varnothing 37 \text{ mm} \times 17 \text{ mm}$, 试件两端面平面度、平行度公差小于 0.05 mm。

实验过程中先将试件加载至设定的围压大小, 再利用分离式 Hopkinson 压杆进行轴向加载, 通过处理动态波形记录仪上记录的入射、反射和透射应力脉冲, 得到材料在该围压下的轴向应力应变曲线。虽然实验加载过程中试件的横向膨胀会导致围压波动^[5], 但考虑到这一膨胀对整个围压装置的容积变化很小, 因此本实验忽略这种影响, 认为实验过程中试件所受围压基本不变。

在使用 Hopkinson 压杆加载时, 采用了脉冲整形技术^[6]。通过对入射波进行脉冲整形, 可以使加载脉冲上升沿变缓, 从而在实验过程中更容易满足试件应力均匀的要求, 同时有效地滤除了加载脉冲中的高频成分, 减少了二维效应引起的波形弥散, 得到的应力应变曲线也更加可靠。

* 收稿日期: 2007-04-12; 修回日期: 2007-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(10372097)

作者简介: 薛志刚(1981—), 男, 硕士, 助理工程师。

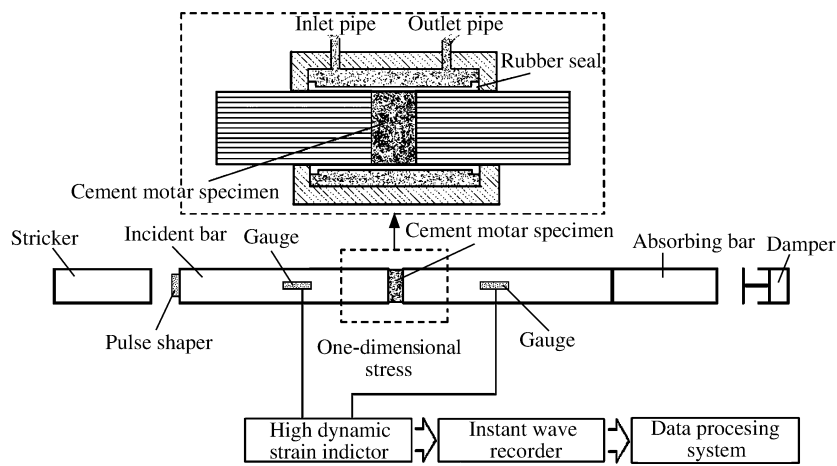


图 1 主动围压装置示意图
Fig. 1 Sketch of active confining facilities

3 实验结果及分析

3.1 应力均匀性要求

实验中输入、输出压杆记录到的典型原始波形如图 2、3 所示。满足试件内应力应变均匀性是 SHPB 冲击压缩实验有效性和可靠性的必要条件。G. Ravichandran 等^[7]提出：试件获得基本的均匀应力应变状态至少需要 4 次来回反射。对于本文实验中所采用的厚度为 17 mm 的水泥砂浆试件，设其平均波速为 3.5 km/s，则应力波在试件中传播一个来回的时间为 10 μs ，而从图中得到的透射波（代表了试件中的应力）可知，试件从受载到破坏的时间已经超过 40 μs ，因而可以认为试件在破坏前已经达到动态应力均匀。

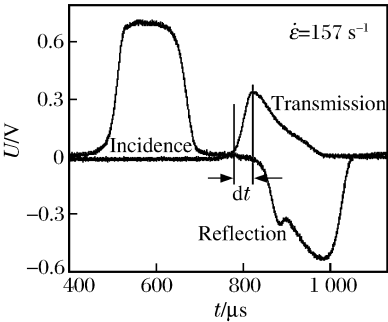


图 2 一维应力下的原始波形
Fig. 2 Original curves under one-dimensional stress

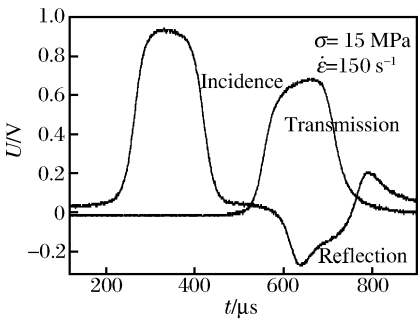


图 3 主动围压下的原始波形
Fig. 3 Original curves under the active confining pressure

3.2 围压对水泥砂浆动态增强的影响

在增加围压的同时相应提高子弹的速度（当围压为 30 MPa 时，子弹速度较围压为 5 MPa 时增加约 1.5 m/s），使应力（ $\sigma_1 - \sigma_3$ ）（扣除了围压部分的轴向力）基本不变，可以使试件以基本相同的应变率变形。为了研究主动围压对水泥砂浆动态增强的影响，做了相同应变率（约 150 s^{-1} ）下主动围压介于 0~30 MPa 的系列实验，处理得到的轴向应力应变曲线如图 4 所示。

图 4 表明，在无围压条件下，试件在冲击载荷作用下呈现脆性破坏。而在主动围压条件下，虽然轴向应变达到 0.02，但还有相当的轴向承载能力，没有软化的趋势，从加载后的水泥砂浆试件看，尽管在试件表面出现了微裂纹，但它仍然保持一个整体。因此，可以认为，在围压下水泥砂浆呈现塑性变形，或称之为伪塑性，即变形量很大，但试件仍未破坏，很多学者^[8-10]建立了物理理论模型研究这种伪塑性。

取轴向应变 $\epsilon_x = 0.0175$ 处的应力（ $\sigma_1 - \sigma_3$ ）作为比较，得到水泥砂浆动态压缩强度随围压的变化曲

线,如图 5 所示。从图中可以看出,主动围压从 5 MPa 提高到 30 MPa 时,水泥砂浆材料的抗压强度仅增加了约 3.5 MPa,而从无围压到 5 MPa 围压,材料的抗压强度(无围压条件下以试件破坏点的应力作为比较)提高了约 50 MPa。我们认为这是由于材料的受力状态发生了变化,导致材料的破坏形态也发生了转变。材料的韧脆特性除与材料内部因素(材料成分、组织结构、杂质分布等)有关外,还与材料的外部因素(应力状态、环境温度、变形速率等)有关。在复杂应力状态下,切应力通常促进塑性变形和导致韧断,拉应力则导致脆断。因此在研究应力状态对材料韧脆特性的影响时,可引入应力状态柔度系数^[11],即最大切应力和等效最大正应力之比,柔度系数越大,材料表现出的韧性越大。在无围压条件下,单向压缩时的柔度系数^[11]为 2,水泥砂浆试件呈脆性破坏,而在主动围压条件下,单向压缩时的应力状态柔度系数则于 2,且随围压的增大而增大,此时,水泥砂浆试件在轴向力作用下可呈现伪塑性变形。

3.3 应变率对水泥砂浆动态增强的影响

材料动态与静态强度的比值称为动态增长因数(dynamic increase factor,简称 DIF)。许多学者^[12-13]对水泥砂浆、混凝土材料的应变率效应进行了研究,P. H. Bischoff 等^[14]对早期混凝土应变率效应的研究成果有一个全面的综述,得到了 DIF 和应变率的函数关系^[15]。但是,对一维应力下应变率效应的产生机理仍有很多不同的看法,主要有自由水的 Stefan 效应、裂纹扩展(损伤演化)的惯性效应、自由水和裂纹扩展惯性效应的共同作用结果以及摩擦效应和惯性效应引起的横向约束等。

图 6 为水泥砂浆在主动围压为 10 MPa,不同应变率下的轴向应力应变曲线,随着应变率的增加,水泥砂浆伪塑性段的动态屈服应力($\sigma_1 - \sigma_3$)也有明显的增加。表明在围压下水泥砂浆同样存在着应变率效应。

4 结 论

为了研究水泥砂浆等脆性材料在围压下的力学性能,研制了适于 Hopkinson 压杆加载的主动围压装置,发现材料在存在围压的条件下,可以由一维应力状态下的脆性破坏转变为整体伪塑性变形,从而导致材料抗压强度大大提高。而且在围压情况下,水泥砂浆也是应变率敏感的。

参考文献:

[1] 施绍裘,程江瑛,李大红,等. 水泥砂浆石在准一维应变下的动态力学性能研究[J]. 爆炸与冲击,2000,20(4):326-332.
SHI Shao-qiu, CHENG Jiang-ying, LI Da-hong, et al. A study on the dynamic mechanical behavior of cement mortar under quasi-one dimensional strain state[J]. Explosion and Shock Waves, 2000,20(4):326-332.
[2] 施绍裘,王礼立. 水泥砂浆石在一维与准一维应变状态下的动态力学响应的比较和讨论[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(3):327-331.
SHI Shao-qiu, WANG Li-li. Discussion on dynamic mechanical behaviors of cement mortar under quasi- and one di-

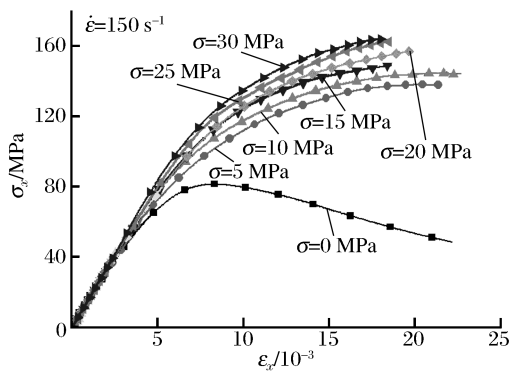


图 4 不同围压下的轴向应力应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curves under different pressures

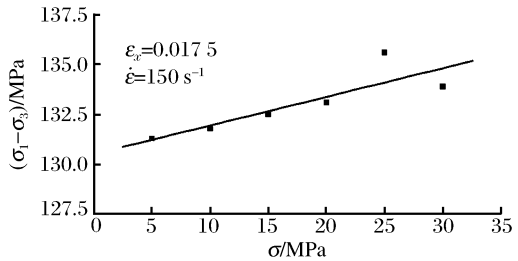


图 5 水泥砂浆动态压缩强度随围压变化曲线
Fig. 5 Dynamic compressive stress curves

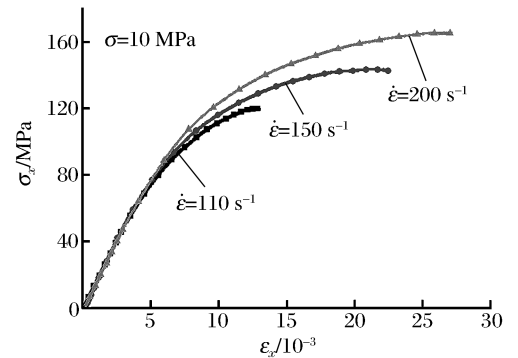


图 6 不同应变率时的轴向应力应变曲线
Fig. 6 Stress-strain curves at different strain rates

- mensional strain states[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001,20(3):327-331.
- [3] Candappa D P, Setunge S, Sanjayan J G. Stress versus strain relationship of high strength concrete under high lateral confinement[J]. Cement and Concrete Research, 1999(29):1977-1982.
- [4] 谢和平,董毓利,李世平. 不同围压下混凝土受压弹塑性损伤本构模型的研究[J]. 煤炭学报,1996,21(3):265-270.
XIE He-ping, DONG Yu-li, LI Shi-ping. Study of a constitutive model of elasto-plastic damage of concrete in axial compression test under different pressures[J]. Journal of China Coal Society, 1996,21(3):265-270.
- [5] Gary G, Bailly P. Behaviour of quasi-brittle material at high strain rate. Experiment and modeling[J]. European Journal of Mechanics A: Solids, 1998,17(3):403-420.
- [6] 孟益平,胡时胜. 混凝土材料冲击压缩试验中的一些问题[J]. 实验力学,2003,18(1):108-112.
MENG Yi-ping, HU Shi-sheng. Some problems in the test of concrete under impact compressive loading[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003,18(1):108-112.
- [7] Ravichandran G, Subhash G. Critical appraisal of limiting strain rates for compression testing of ceramics in a split Hopkinson pressure bar[J]. Journal of American Ceramic Society, 1994,77:263-267.
- [8] Binici B. An analytical model for stress-strain behavior of confined concrete[J]. Engineering Structures, 2005,27:1040-1051.
- [9] Luccioni B M, Rougier V C. A plastic damage approach for confined concrete[J]. Computers and Structures, 2005,83:2238-2256.
- [10] Mattei N J, Mehrabadi M M, Zhu H. A micromechanical constitutive model for the behavior of concrete[J]. Mechanics of Materials, 2007,39(4):357-379.
- [11] 匡震邦,顾海澄,李中华. 材料的力学行为[M]. 北京:高等教育出版社,1998.
- [12] Grote D L, Park S W, Zhou M. Dynamic behaviour of concrete at high strain rates and pressures: I. Experimental characterization[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,25:869-886.
- [13] Ross C A, Tedesco J W, Kuennen S T. Effects of strain rate on concrete strength[J]. ACI Material Journal, 1995,92(1):37-47.
- [14] Bischoff P H, Perry S H. Compressive behavior of concrete at high strain rates[J]. Materials and Structures, 1991,24:425-450.
- [15] 巫绪涛. 碳纤维高强混凝土动态力学性质的研究[M]. 安徽合肥:中国科学技术大学出版社,2006:4-11.

Dynamic behavior of cement mortar under active confinement

XUE Zhi-gang^{*}, HU Shi-sheng

(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

Abstract: The behavior of quasi-brittle materials like cement mortar depends on the level of confinement. In order to study the dynamic behavior of cement mortar under active confinement, An device which fits the split Hopkinson bar loading was developed, and it provides the lateral confining pressure upper to 30 MPa. The axial stress-strain curves under various level of confinement and strain rate were derived according to the experiment. It shows that the strength and ductility increase significantly because of confinement, and finally turn into plasticity, also it is strain rate sensitive.

Key words: solid mechanics; dynamic Behavior; active confinement; cement mortar; split Hopkinson pressure bar

* Corresponding author: XUE Zhi-gang
E-mail address: als@mail.ustc.edu.cn
Telephone: 86-551-3601249